

# Multidisziplinäre Verdichterkonzepte mit neuartigen Werkstoffsystemen

Werkstoff-Kolloquium Dezember 2013 in Köln

Frank Kocian

Dr. Joachim Hausmann

Prof. Dr. Marion Bartsch

Dr. Eberhard Nicke

Dr. Joachim Belz

Inst. f. Bauweisen- und  
Konstruktionsforschung

Inst. f. Werkstoff-Forschung

Inst. f. Werkstoff-Forschung

Inst. f. Antriebstechnik

Inst. f. Aeroelastik

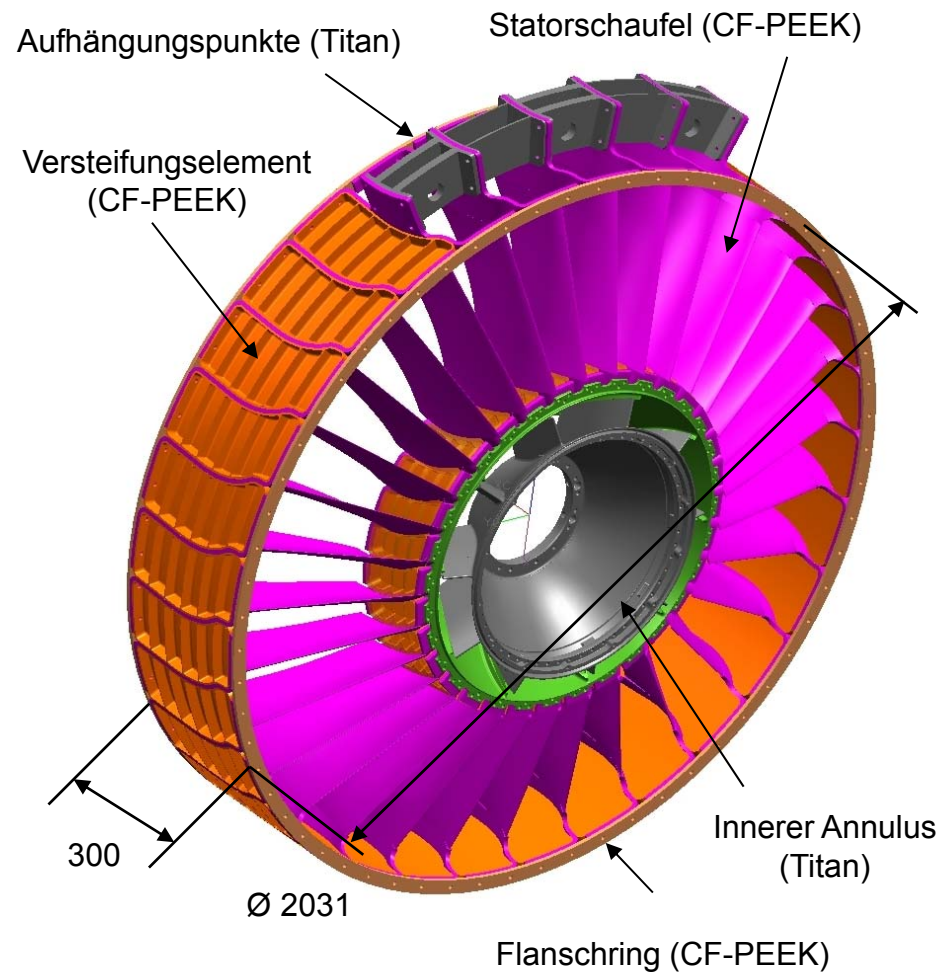


## Inhalt

- Fertigung einer lasttragenden Leitschaufel
- Analyse der Technologie
- Technologische Weiterentwicklung CRISP II
- Aerodynamische Weiterentwicklung CRISP II
- Strukturmechanische Modellbildung CRISP II
- Aeroelastische Analysen für CRISP II
- Materialkombination für optimale Funktionalität
  - Modellierung eines Interfaces
  - Entwicklung eines effizienten Material Interfaces
- Zusammenfassung



# Fertigung einer lasttragenden Leitschaufel



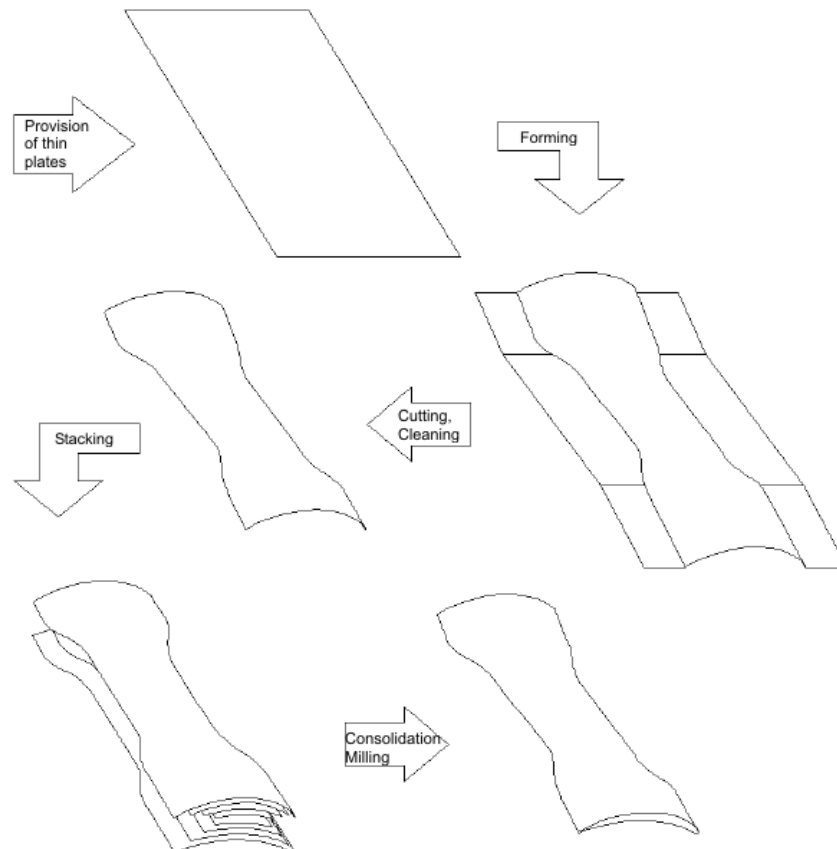
Hergestellte lasttragende  
Leitschaufel (CF-PEEK)



# Fertigung einer lasttragenden Leitschaukel

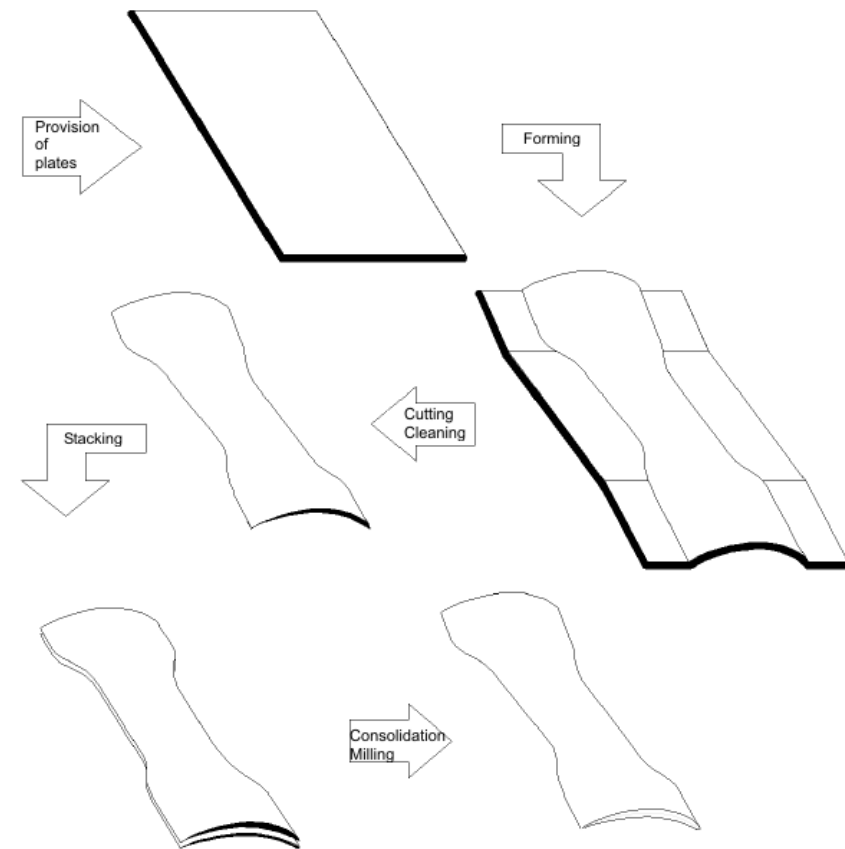
## Variante I

- Mehrere dünne Platten / Einzellagen
- Umformung und Zuschnitt
- Konsolidierung



## Variante II

- Zwei dicke Platten
- Umformung und Zuschnitt
- Konsolidierung





# Fertigung einer lasttragenden Leitschaukel



Transporteinheit zur  
Lagerung der Platten

Infrarot Vorheizfeld

Heizbare Presse



# Fertigung einer lasttragenden Leitschaukel



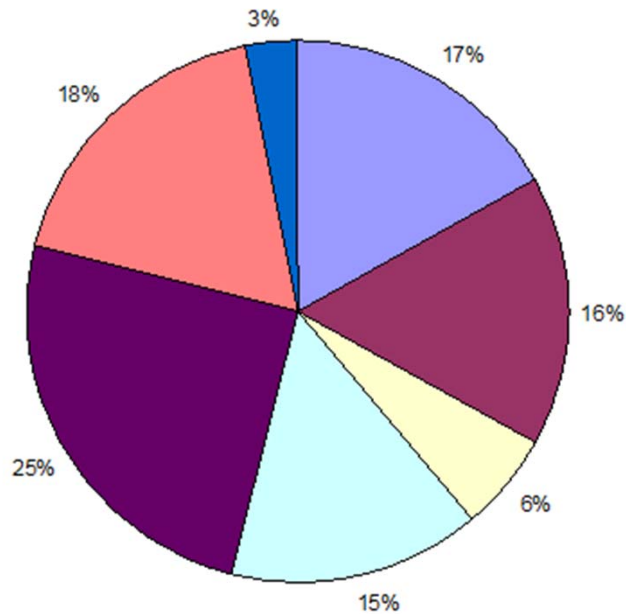
## Herstellung Variante I

- Umformung und anschließender Zuschnitt mittels Wasserstrahl
- „Blech“- Positionierung durch Laserprojektion
- Einbringen zusätzlicher Matrix durch Folien
- Viele Einzelzuschnitte sind notwendig – bessere Anpassung der Struktur an die Fertigung



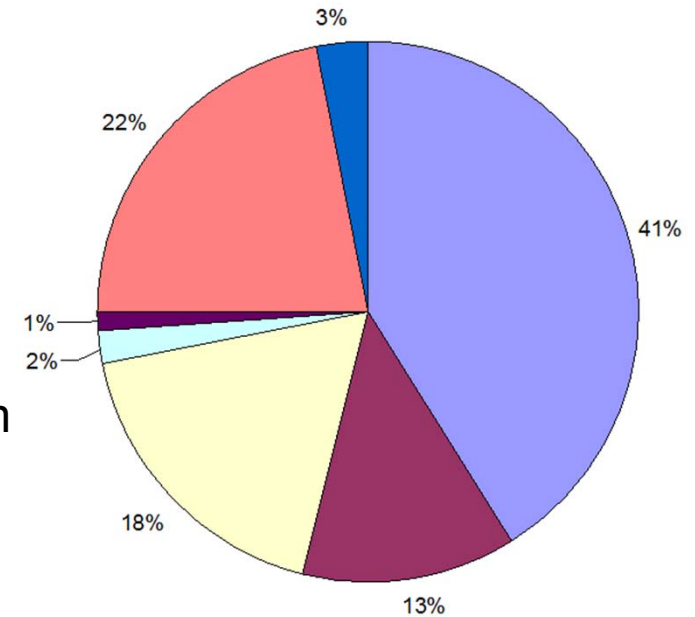
# Analyse der Technologie

## Variante I Kostenanteile



■ Plattenherstellung  
■ Vorformen  
■ Zuschnitt / Fräsen  
■ Vorkonditionierung  
■ Bestückung der Form  
■ Konsolidierung  
■ Endbearbeitung

## Variante II Kostenanteile



- Kostenkalkulation zusammen mit Projektpartner RRD
- Einsparung von 17 % bei Wechsel von Variante I zu Variante II
- Weiteres Optimierungspotenzial für Variante II bietet die automatisierte Plattenherstellung





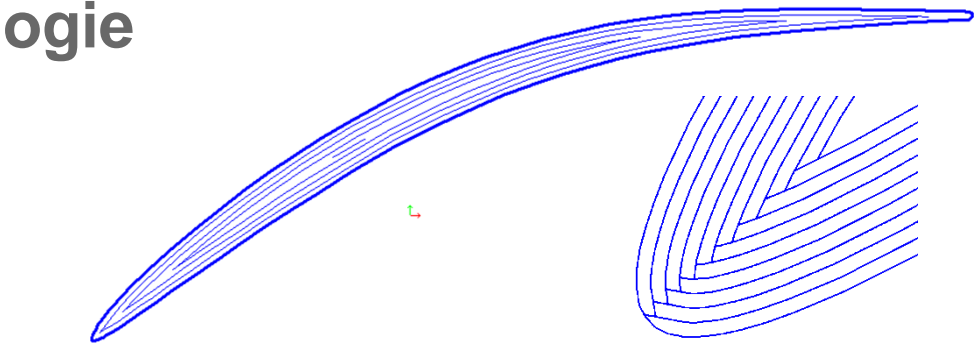
# Analyse der Technologie

## Herkömmliche Lösung:

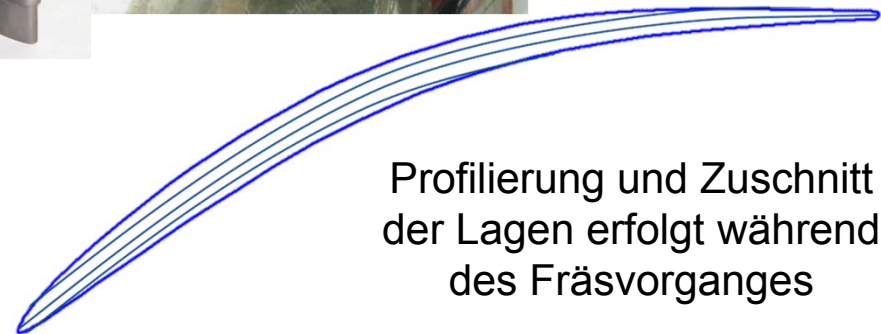
- Zwiebelschalenaufbau der Lagen im Profil
- Einzelne Zuschnitte müssen exakt in die Form passen
- Herstellungsaufwand sehr hoch

## Neues Fertigungskonzept:

- Zur Blattherstellung wird ein „organisches Blech“ in einer Heißpresse umgeformt
- Skelettflche ist Mittelfläche des Blattrohlings
- Das endgültige Blattprofil entsteht durch Fräsbearbeitung der Außenkontur



Profilierung durch  
Einzellagenaufbau  
am Beispiel eines  
Profilabschnittes



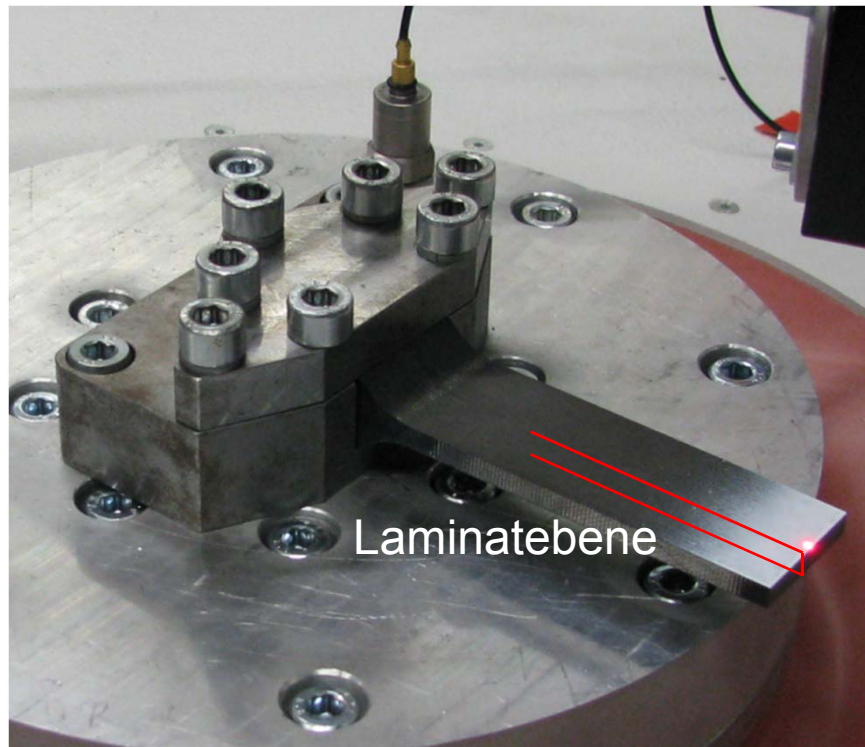
Profilierung und Zuschnitt  
der Lagen erfolgt während  
des Frsvorganges





## Analyse der Technologie

- Gegenüber konventionellen Bauweisen enden hier Fasern an der Bauteiloberfläche – Shakerversuche zum Nachweis ausreichender Festigkeit unter zyklischer Last
- Nachträgliche Oberflächenbearbeitung muss ausreichende Qualität bereitstellen – Nachweis erfolgte durch Bearbeitung von Teststrukturen



Versuche an Proben mit Lagenebene = Schwingebene bei  $10^7$  Lastzyklen (50% 0° und 50% +/-45°)

Versuch1:  $\sigma_x = 472.8\text{MPa}$ ,  $\epsilon_x = 0.619\%$

Versuch2:  $\sigma_x = 411.5\text{MPa}$ ,  $\epsilon_x = 0.538\%$

Versuch3:  $\sigma_x = 437.8\text{MPa}$ ,  $\epsilon_x = 0.573\%$

Versuch4:  $\sigma_x = 429.0\text{MPa}$ ,  $\epsilon_x = 0.561\%$

Versuch5:  $\sigma_x = 437.8\text{MPa}$ ,  $\epsilon_x = 0.573\%$

Höhere Spannungen ohne Modifikationen nicht möglich aufgrund Überhitzung des Shakers

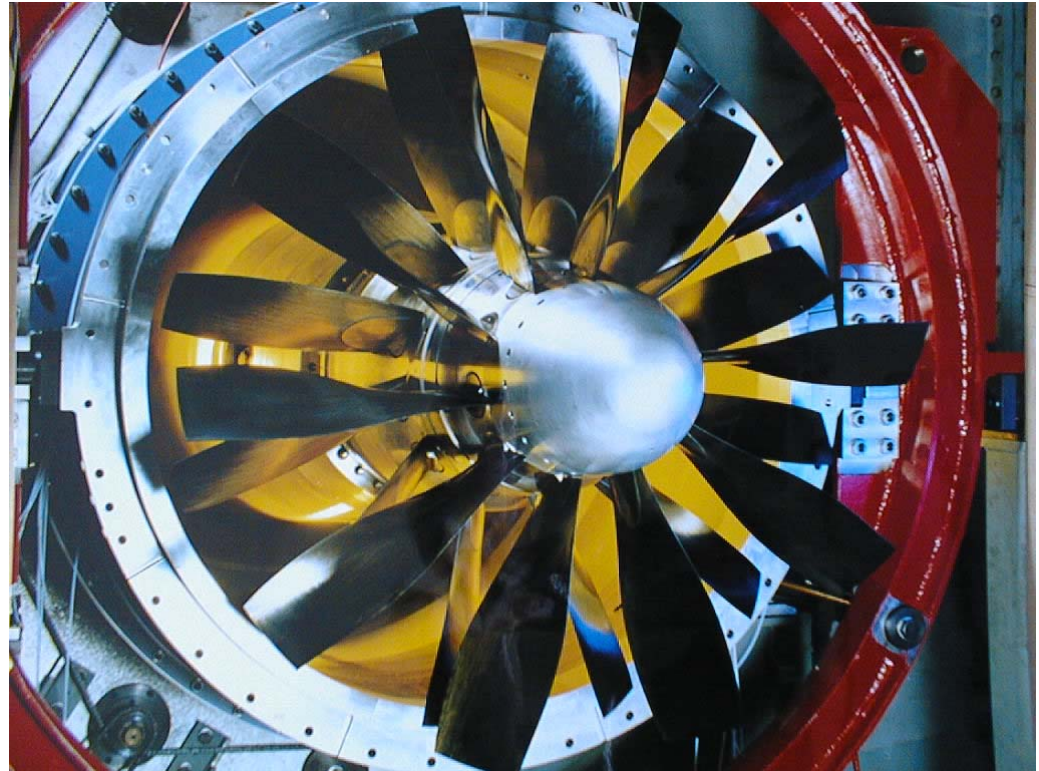


# Technologische Weiterentwicklung CRISP II

(Counter Rotating Integrated Shrouded Propfan)

## Ziele:

- Wirkungsgradsteigerung gegenüber klassischem Fan
- Niedrige Schallemission
- Leichtbau
- Vereinfachte Fertigungstechnik der Blätter



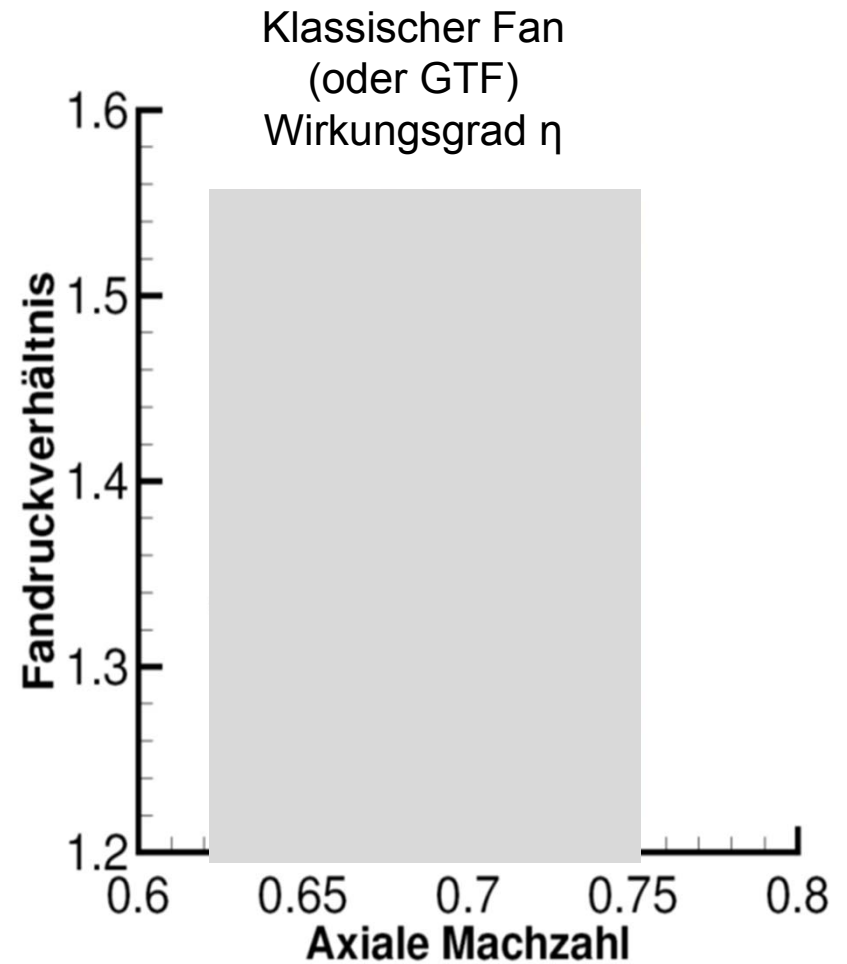
Von MTU entwickelter und vom DLR  
getesteter CRISP Verdichter



# Aerodynamische Weiterentwicklung CRISP II

## Entwicklung Fandruckverhältnis + Bypassverhältnis

- **IAE V2500 Technologielevel 2000**
  - BPR: ~ 4.8-4.9
  - Fandruckverhältnis ~ 1,6
  - Axialmachzahl ~ 0.6
- 
- **GTF (PW1100G) Technologielevel 2012**
  - BPR@ Takeoff: ~12;
  - BPR @ Cruise: ~ 10
  - Fandruckverhältnis@Cruise ~ 1.48
  - Axialmachzahl ~ 0.6 - 0.65



Quelle: T. Lengyel-Kampmann

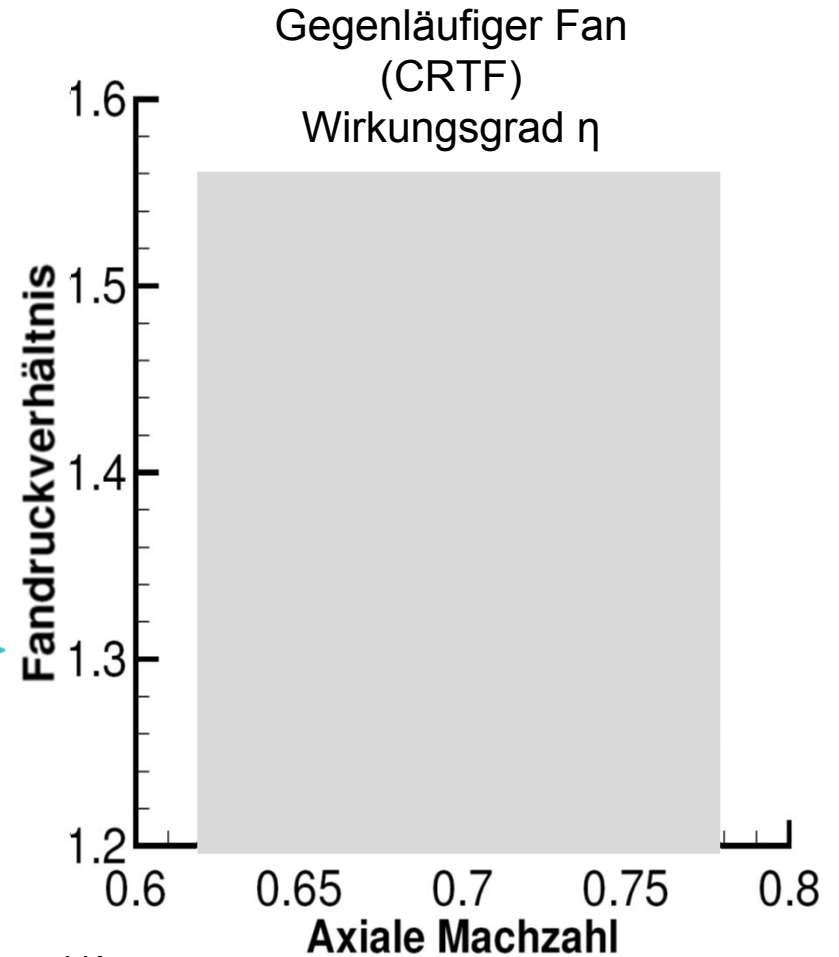




# Aerodynamische Weiterentwicklung CRISP II

## Entwicklung Fandruckverhältnis + Bypassverhältnis

- **IAE V2500 Technologielevel 2000**
- BPR: ~ 4.8-4.9
- Fandruckverhältnis ~ 1,6
- Axialmachzahl ~ 0.6
- **GTF (PW1100G) Technologielevel 2012**
- BPR@ Takeoff: ~12;
- BPR @ Cruise: ~ 10
- Fandruckverhältnis@Cruise ~ 1.48
- Axialmachzahl ~ 0.6 - 0.65
- **CRISPII-Triebwerk:**
- Technologielevel 2025 / underwing installation
- BPR ~ 15
- Fandruckverhältnis ~ 1.3
- Axialmachzahl ~ 0.7

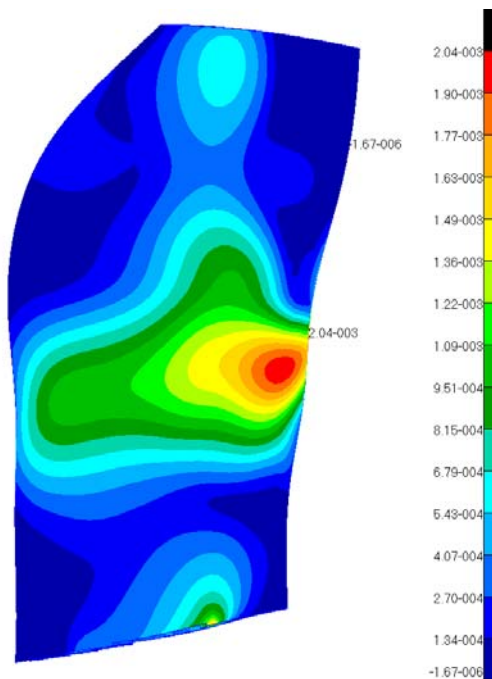


Quelle: T. Lengyel-Kampmann



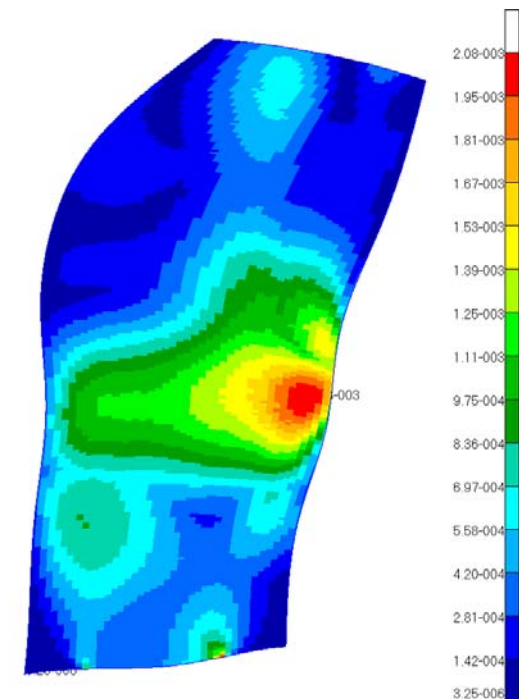
## Strukturmechanische Modellbildung CRISP II

- Die Strukturanalyse der CFK-Beschaufelung erfolgt unter Aufprägung von Drucklasten aus der Aerodynamik und Rotationslasten
- Neben der statischen Spannungsermittlung werden auch Eigenfrequenzen und Eigen(schwingungs)formen ermittelt
- Zur detaillierten Auswertung von CFK Materialien ist eine Schalenmodellierung erforderlich

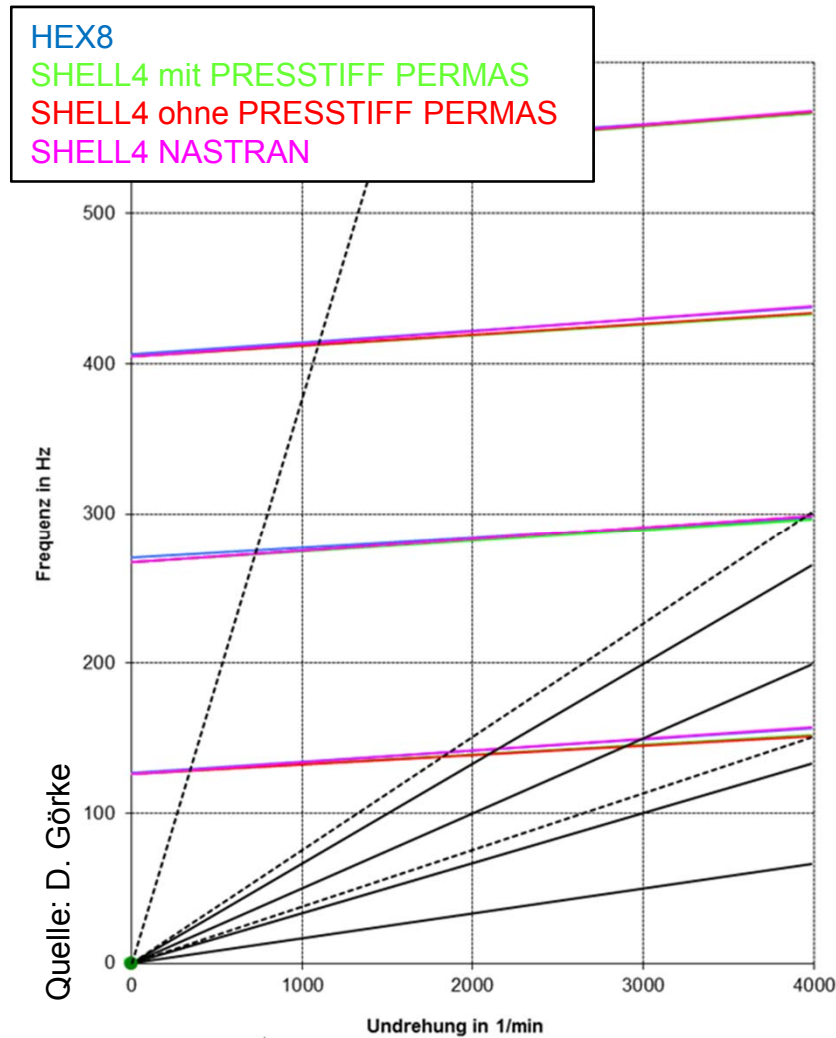


Volumenmodell (links) zeigt  
weitgehend identische  
Hauptdehnungen für Rotor 2  
im Vergleich zur  
Schalenmodellierung (rechts)

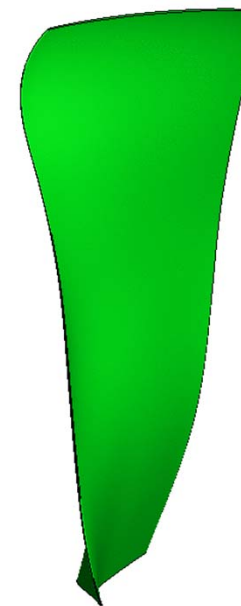
Quelle: D. Görke



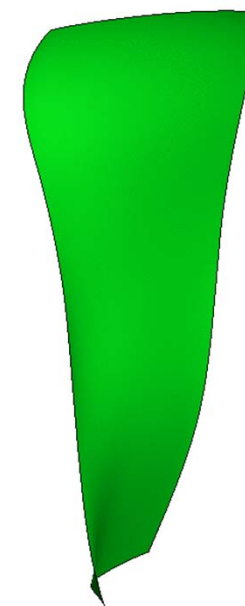
# Strukturmechanische Modellbildung CRISP II



- Genaue Kenntnis der **Eigenfrequenzen** und **Eigenformen** ist die Basis für aeroelastische Analysen
- Vergleiche zwischen verschiedenen Programmen und Modellierungen zeigen gute Übereinstimmung für die Dynamik



Hexaeder



Schalen

Quelle: M. Blocher





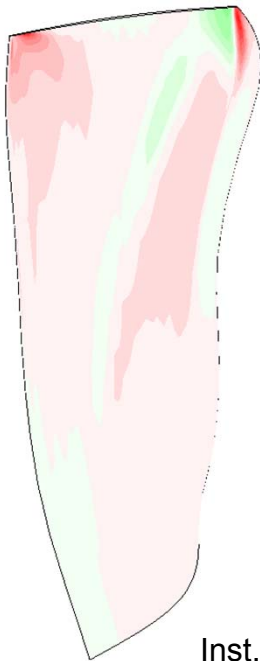
# Aeroelastische Analysen für CRISP II

## Flattern

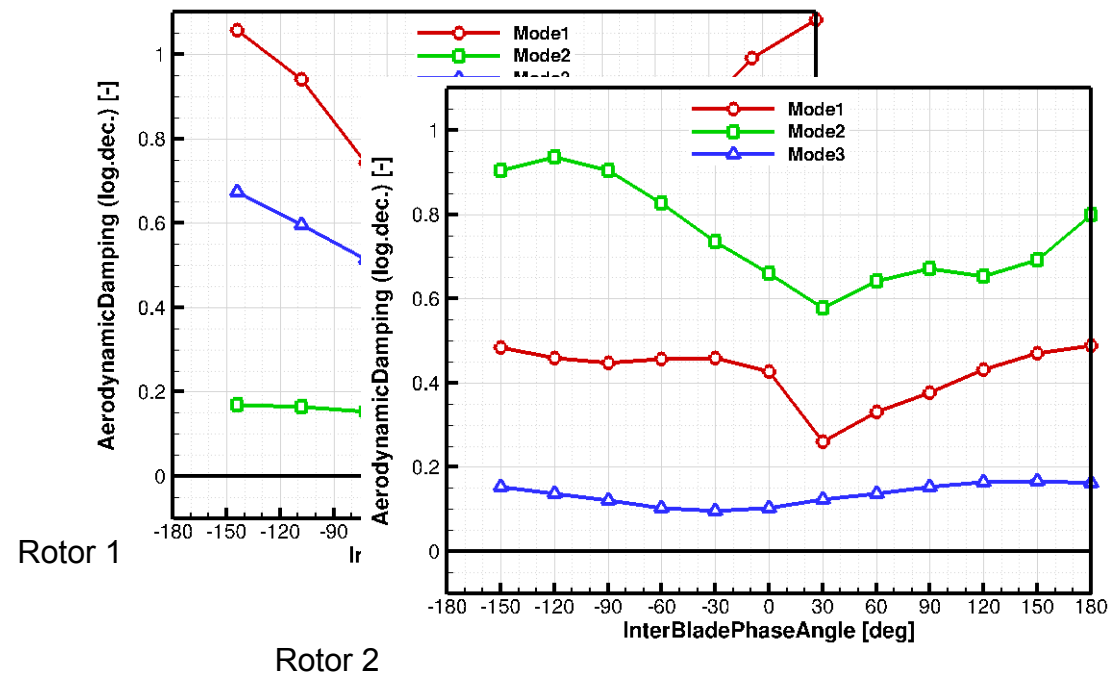
Überprüfung der Flatterneigung für beide Rotoren

- vorgegebene Schaufelschwingung in den berechneten Eigenformen
- Berechnung der dadurch hervorgerufenen instationären Luftkräfte
- Auswertung über Arbeitsaustausch zwischen Fluid und Struktur
- Ergebnis: aerodynamische Dämpfung für Rotor 1 und Rotor 2

Quelle: M. Blocher



Inst. Drücke, Rotor 1

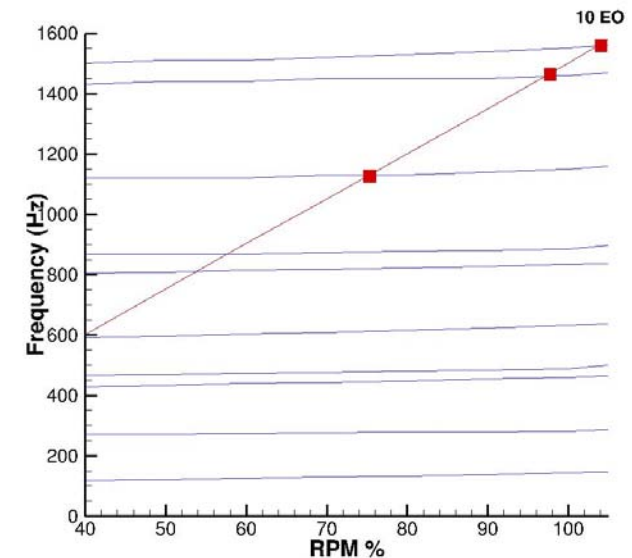
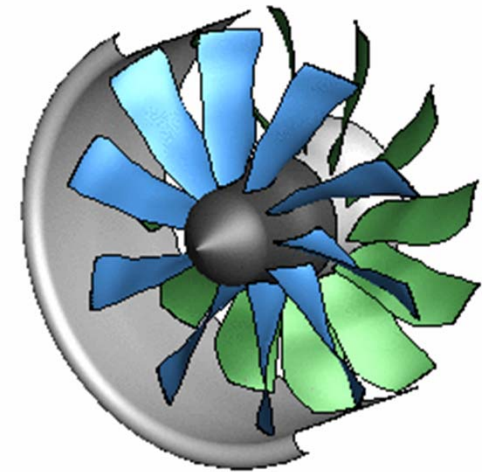


# Aeroelastische Analysen für CRISP II

## Forced Response

- Bestimmung der maximalen Schwingungsamplituden durch Rotor-Rotor-Wechselwirkung
- Identifikation von kritischen Betriebspunkten aus Campbell-Diagramm
  - Ermittlung von Anregungsfrequenz, Schaufelmode und IBPA
  - Vergleich
    - Arbeitseintrag durch Rotoranregung
    - aufgezeehrte Schwingungsenergie durch aerodyn. Dämpfung

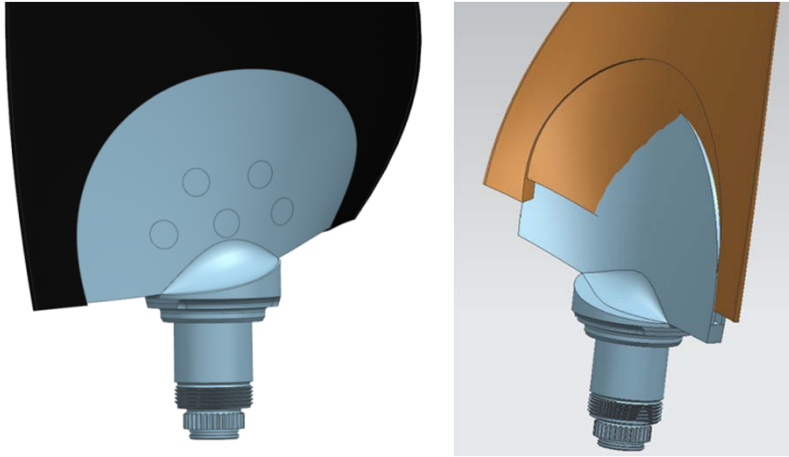
Berechnung der maximal auftretenden Schwingungsamplituden als Basis für weitere strukturelle Analysen



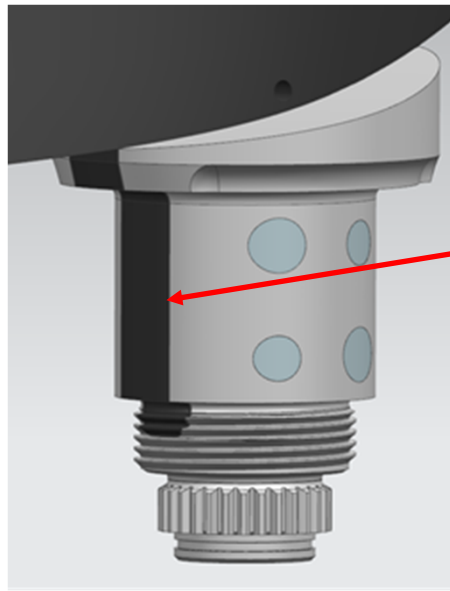
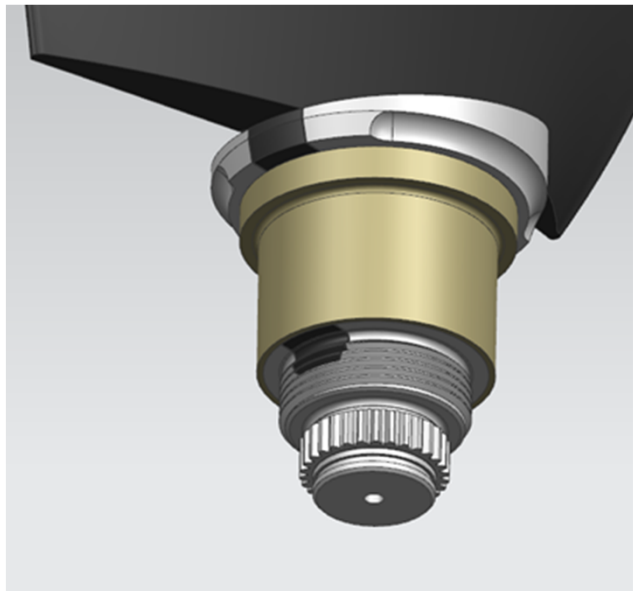
Quelle: M. Blocher



## Materialkombination für optimale Funktionalität



- Materialkombinationen essenziell für Krafteinleitung und z.B. Erosionsschutz
- Ursprüngliche CRISP Krafteinleitung muss angepasst werden wegen aerodynamischer Formgebung des Blattes



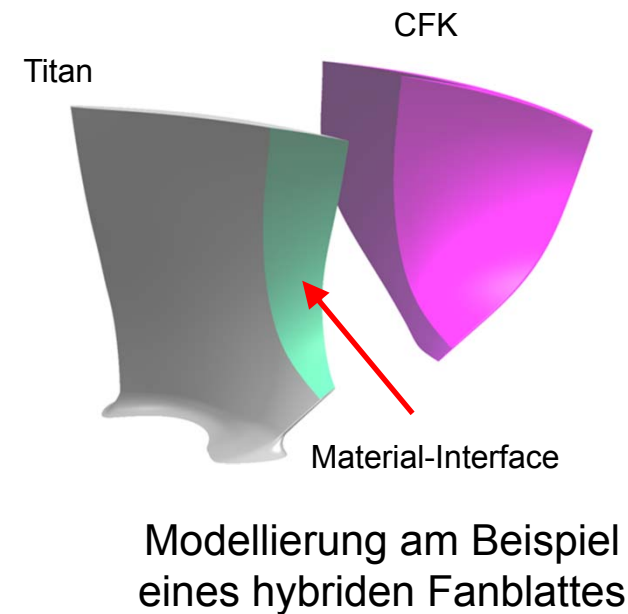
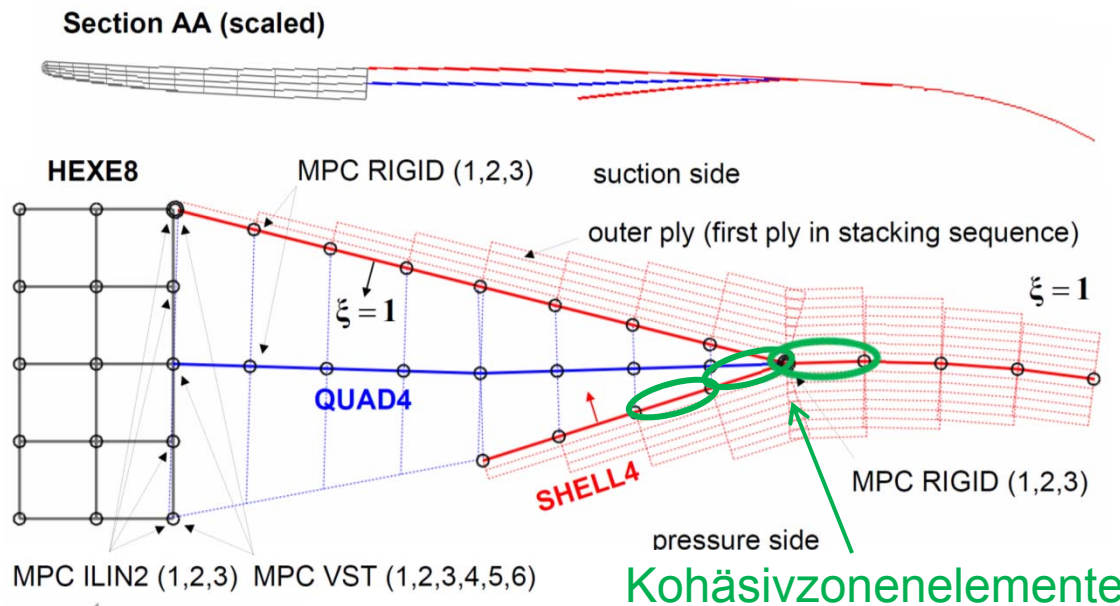
Interface muss in die integrale Auslegung und Bewertung mit einbezogen werden





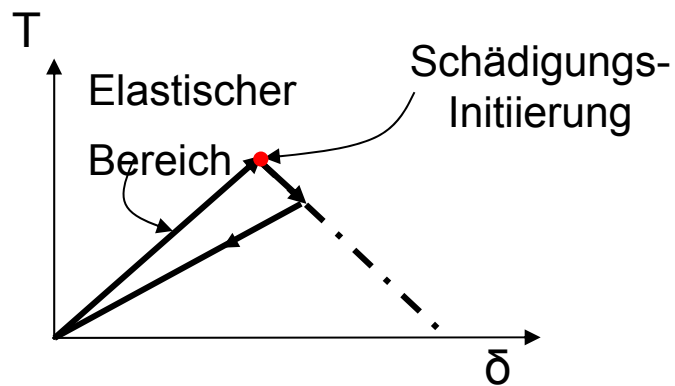
# Modellierung des Interfaces

- Numerische Beschreibung des Interfaces mittels Kohäsivzonenelementen
- Belastungs-Separations-Beziehung → Delaminationsverhalten bei
  - quasistatischer Belastung und
  - zyklischer Belastung
- in Abhängigkeit von der Orientierung der Fasern im CFK-Laminat
- In Abhängigkeit vom Mode-Mix der Beanspruchung

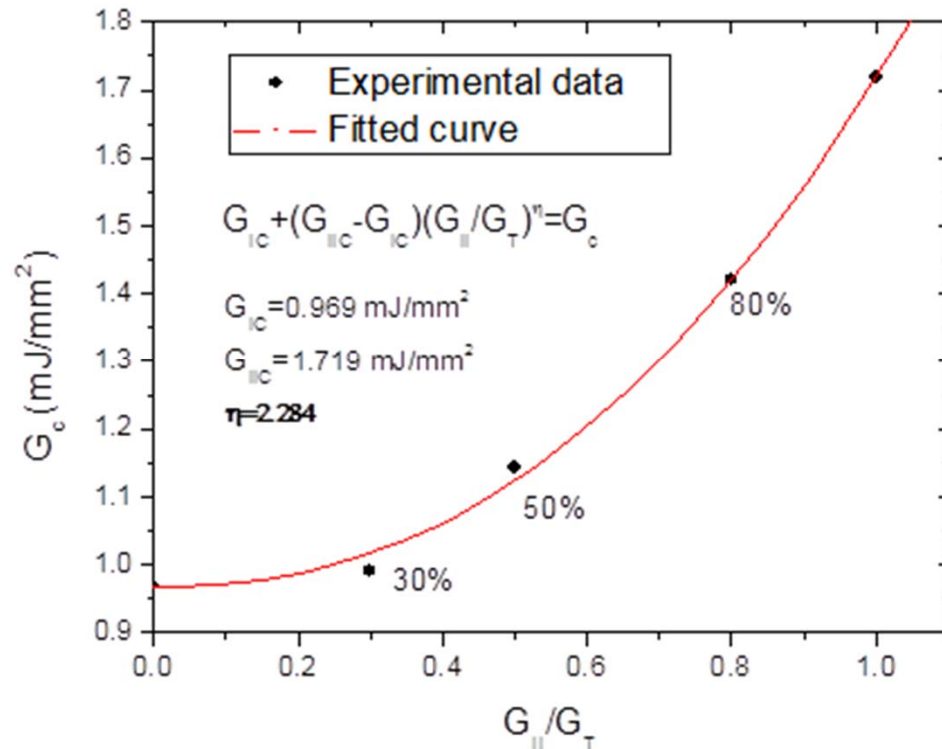


# Modellierung des Interfaces

## Last-Verformungsverhalten (bilinear-er Ansatz)



- Reduzierung der Steifigkeit der Kohäsivelemente durch Schädigung (Delamination)
- Implementierung in FE-Software als User Defined Finite Element
- Experimentelle Ermittlung der kritischen Energiefreisetzungsrate für verschiedene Mode-Mixities

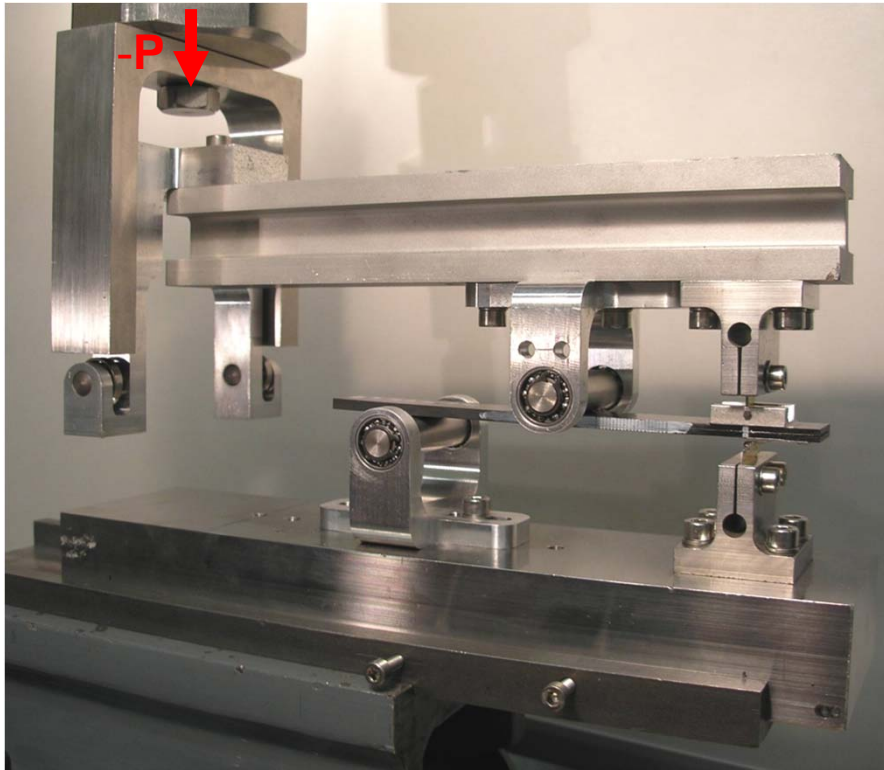


Beispielhafte Ermittlung der kritischen Energiefreisetzungsrate  $G_c$  für unterschiedliche Mixed-Modes

Quelle: P. Naghipour



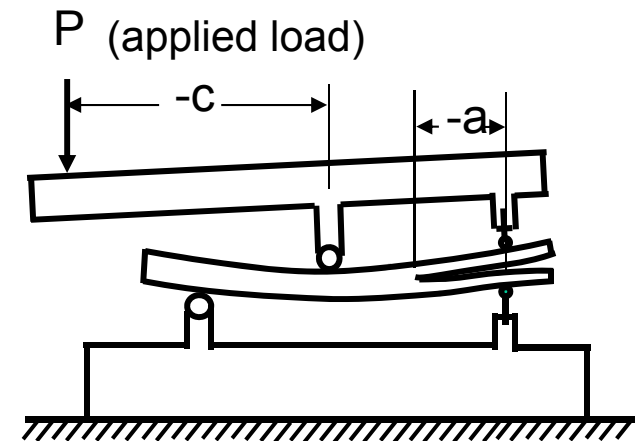
# Modellierung des Interfaces



Probe: CFK- und Metall-Lagen  
Breite = 25 mm, Länge = 150 mm,  
Dicke = 3 – 5 mm  
Anfangs-Delaminationsriss:  $a_0 = 50$  mm



Überlagerung von Mode I + Mode II



Messgrößen: Last  $P$  und Verschiebung  
des Lastangriffspunktes  $\delta$ ;  
Anfangsrisslänge  $a$   
Berechnung der Energiefreisetzungsraten:  
 $G_I$ ,  $G_{II}$ , mode I und II

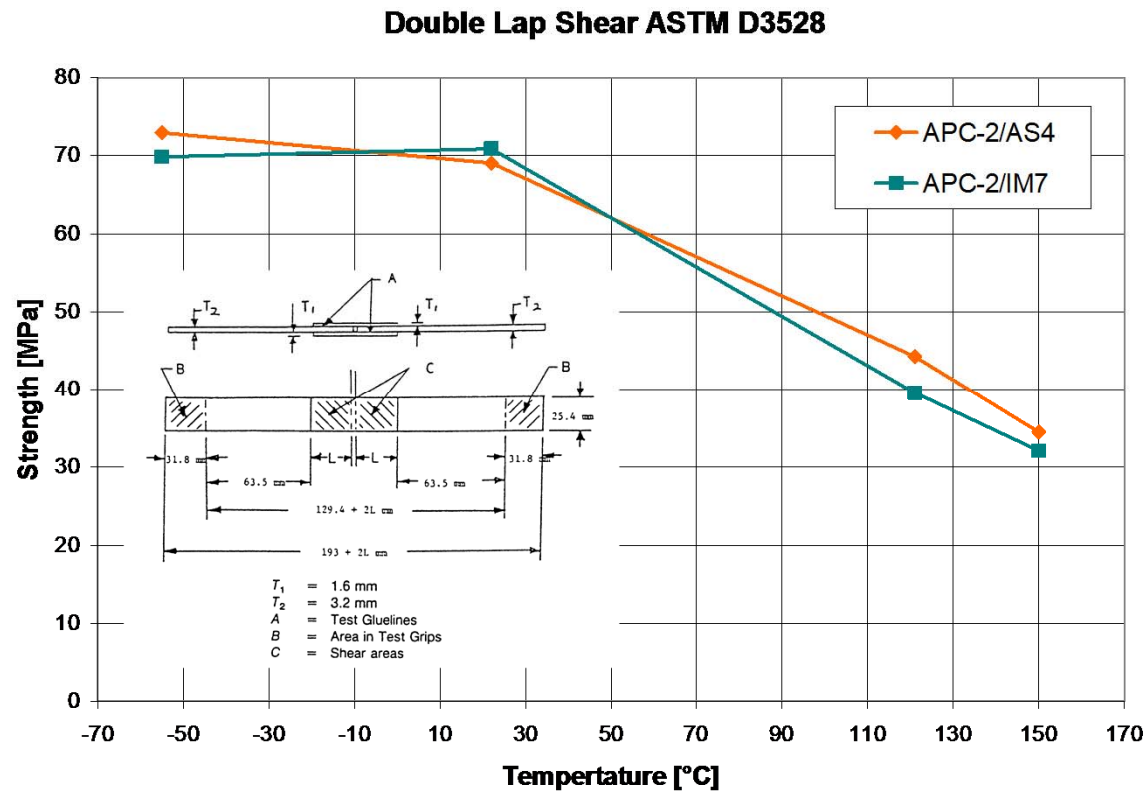
Quelle: P. Naghipour





# Entwicklung eines effizienten Material Interfaces

Ausgangspunkt: Hohe Materialfestigkeiten  
bei der Fügung von CF-PEEK und Titan

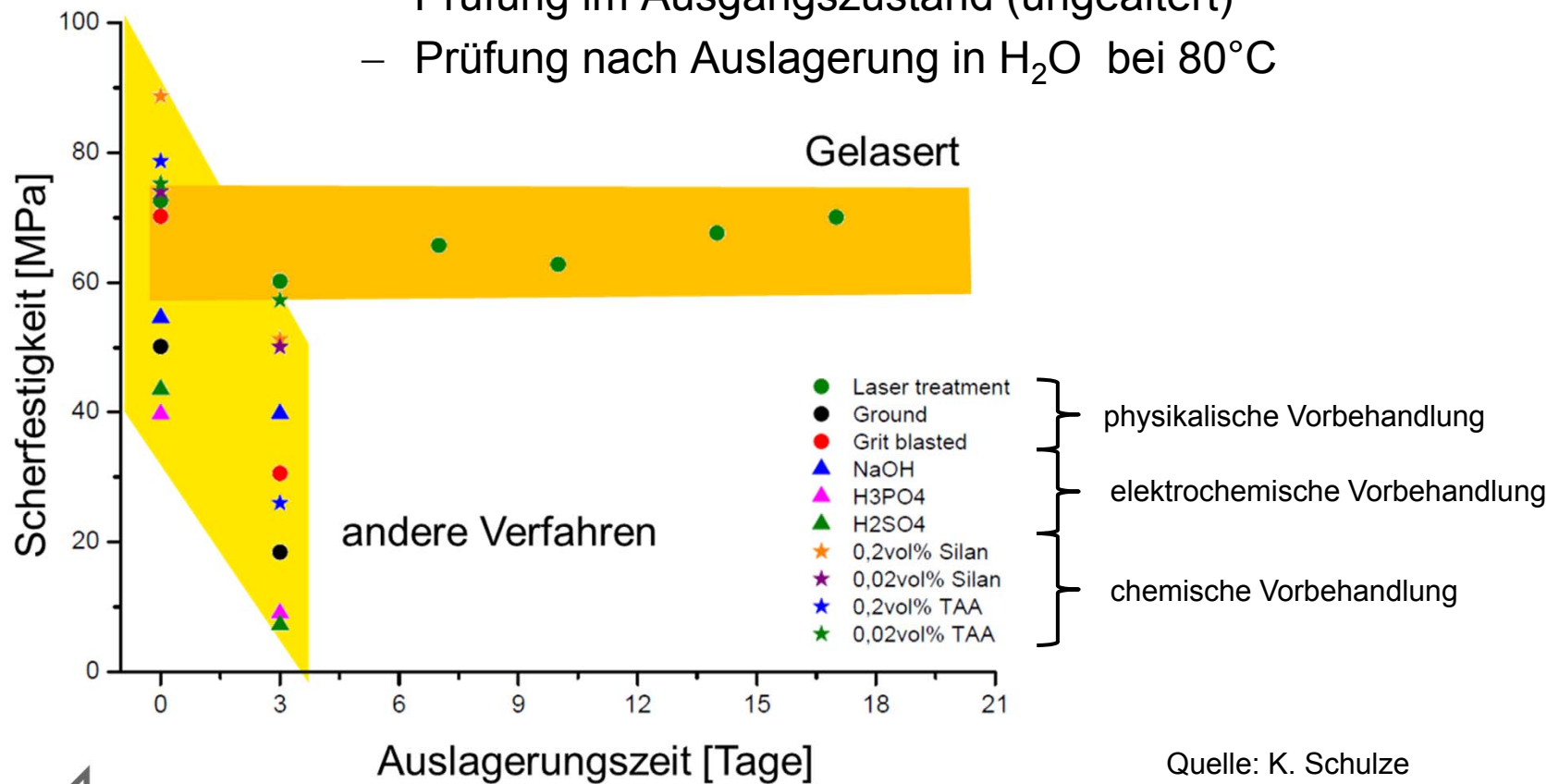


**Problem: Alterungsbeständigkeit!**



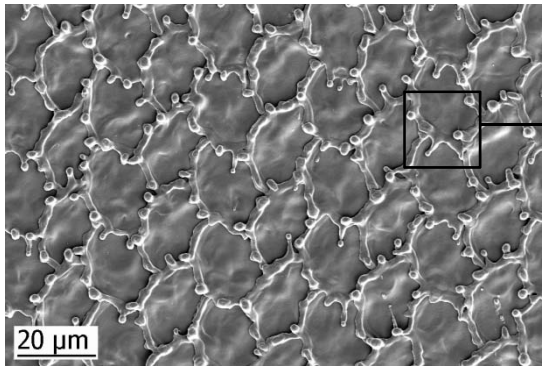
# Entwicklung eines effizienten Material Interfaces

- Angestrebte Materialkombination Titan – CF-PEEK
- Entwicklung des Interfaces auf Basis der Fügung von Ti-3Al-2,5V mittels PEEK
- Zugscherproben und –prüfung in Anlehnung an DIN EN 1465
  - Prüfung im Ausgangszustand (ungealtert)
  - Prüfung nach Auslagerung in H<sub>2</sub>O bei 80°C



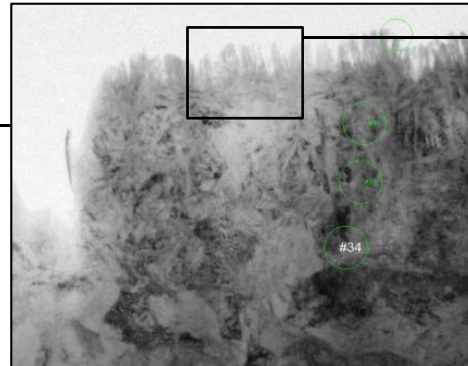
# Entwicklung eines effizienten Material Interfaces

## Oberflächenvorbehandlung Nd:YAG-Laser in Umgebungsluft



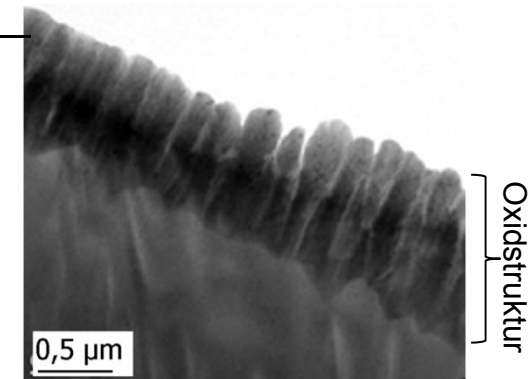
REM-Aufnahme:

Näpfchenstruktur (Näpfchen und umlaufende Ränder), Schmelzspritzer



TEM-Aufnahme:

Mikrostruktur auf gesamter makrostrukturierter Oberfläche



TEM-Aufnahme:

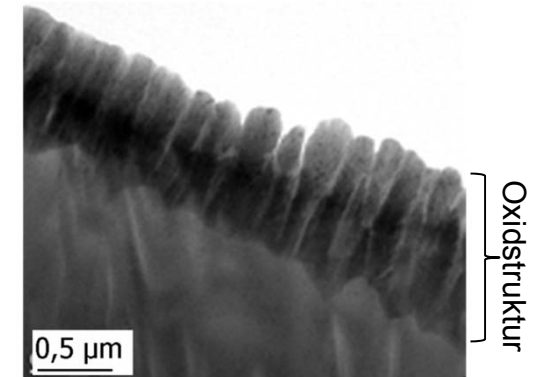
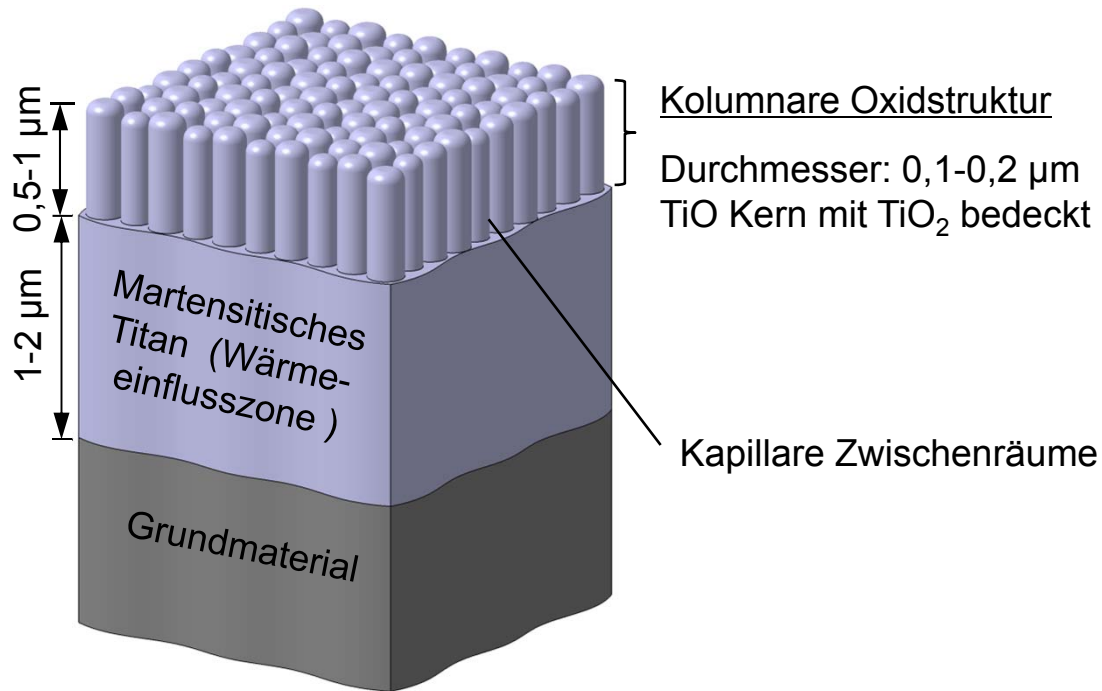
Kolumnare Oxidstruktur



Quelle: K. Schulze

# Entwicklung eines effizienten Material Interfaces

## Oberflächenvorbehandlung Nd:YAG-Laser in Umgebungsluft



TEM-Aufnahme:

Kolumnare Oxidstruktur

- Mechanische Adhäsion auf verschiedenen Längenskalen durch
  - Hinterschneidungen der Näpfchenstruktur
  - Kapillare Zwischenräume der kolumnaren Oxidstruktur
- Gutes Benetzungsverhalten (Kapillarwirkung)

Quelle: K. Schulze





## Zusammenfassung

- Werkstoffthemen sind eingebettet in ganzheitliche Betrachtungsweisen – das DLR bietet hier eine einzigartige Forschungs- und Entwicklungsplattform
- Enge Koppelung zur Anwendung ermöglicht schnelle Identifikation von Entwicklungs- und Forschungsbedarf
- Optimierungspotenziale sind vor allem durch Interdisziplinarität gegeben und werden auch so genutzt
- Die Vielzahl der Einflussparameter, besonders bei hybriden Strukturen, werden uns auch in der Zukunft speziell im Werkstoffbereich beschäftigen, um weitere Potenziale zu erschließen



# Vielen Dank für Ihre Aufmerksamkeit!

## Kontakt

Institut für Bauweisen- und Konstruktionsforschung  
Pfaffenwaldring 38 – 40  
70569 Stuttgart

Dipl.-Ing. Frank Kocian  
+49 (0)711 / 6862 - 664

